

doi: 10.7690/bgzdh.2022.12.002

基于扰动观测器的炮控系统自适应鲁棒控制

吴斌¹, 童仲志¹, 巩晋², 高强¹, 瞿万里¹, 羊书毅¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 中国兵器工业导航与控制技术研究所, 北京 100089)

摘要: 针对坦克快速运动过程中火炮控制系统存在一系列复杂的非线性问题, 提出一种自适应鲁棒控制方法。结合自适应控制智能优化自身参数的特点和鲁棒控制的稳定性特点, 通过设计一种能够实时准确测定扰动项扰动观测器加入到控制策略中, 从而精确补偿扰动。仿真结果表明: 该控制策略能较好地提升炮控系统的抗干扰能力和稳定性, 有效提高坦克行进间的射击精度。

关键词: 交流伺服控制; 自适应鲁棒控制; 扰动观测器; 炮控系统

中图分类号: TJ38 **文献标志码:** A

Adaptive Robust Control of Gun Control System Based on Disturbance Observer

Wu Bin¹, Tong Zhongzhi¹, Gong Jin², Gao Qiang¹, Qu Wanli¹, Yang Shuyi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Navigation and Control Technology Institute of China North Industries Group Corporation, Beijing 100089, China)

Abstract: An adaptive robust control method is proposed to solve a series of complex nonlinear problems in the gun control system during the rapid movement of the tank. Combining the characteristics of intelligent optimization of self-parameters in adaptive control and the stability of robust control, a disturbance observer which can accurately measure the disturbance term in real time is designed and added to the control strategy, so as to accurately compensate the disturbance. The simulation results show that the control strategy can improve the anti-interference ability and stability of the gun control system, and effectively improve the firing accuracy when the tank is moving.

Keywords: AC servo control; adaptive robust control; disturbance observer; gun control system

0 引言

正如我们所知, 炮控系统是坦克的灵魂, 稳定的炮控系统不但决定了坦克优异的性能, 也是坦克在同时找到对手的情况下, 先手歼敌的保障。研究表明, 现代战争中对坦克炮控系统的性能要求越来越高, 高速行进间条件下的精确打击性能尤为明显^[1]。

传统坦克行进间射击的行驶速度一般在 20~25 km/h 以内, 目前大多数关于坦克振动动力学的研究也将此作为背景。随着时代的进步, 国防军事和新时代战场的需要, 目前坦克的机动性能和作战条件发生了很大变化, 预计未来主战坦克的最大速度有望达到 100 km/h 以上, 平均越野速度有望达到 55 km/h 以上^[2-4]。如果坦克以低速前进, 非线性问题一般不会被注意到, 一般采用线性化方法处理, 就可以得到满足工程实际精度需要的结果; 但随着未来主战坦克机动性的提高及路面条件的恶化, 坦克受到的振动激励将会发生重大变化。在高速机动条件下, 坦克系统的许多零部件将工作在极限应力

环境下, 存在多形态的各种接触、摩擦等因素, 零部件的性能参数之间的非线性现象尤为严重, 线性化处理带来的误差将明显增大。这些非线性因素的存在, 阻碍了坦克炮控系统向更精细化、稳定化前进的脚步。

目前, 对于高速机动坦克的研究较少, 王天雄等^[5]通过建立外弹道模型, 研究了在高速机动条件下, 坦克目标前进点预测误差对射击精度的影响。王钦钊等^[6]分析了高速机动条件下影响坦克火控系统性能的射击误差因素, 并分析了如何将误差降到最小。李长兵等^[7]研制了火炮扰动力矩谱测试系统, 并在实际目标车辆进行了实验验证。此外, 韩宝坤等^[8]分析了由于履带车辆自身结构的复杂性及用车环境的多样性导致对履带车辆的研究周期较长, 花费较大, 提出可以利用仿真技术对履带车辆进行研究, 极大地促进了履带车辆的发展。文献^[9]将系统进行简单的线性化建模处理, 因此会存在较大误差无法满足战争中精准打击的要求。文献^[10]中 PID 控制被用来控制移动中的坦克射击, 但该文中所建

收稿日期: 2022-08-24; 修回日期: 2022-09-28

作者简介: 吴斌(1996—), 男, 江苏人, 硕士, 从事智能控制研究。E-mail: 13182359068@163.com。

立的模型未能考虑路面激励的影响，所以存在一定误差。

智能控制是近年来解决此类非线性问题的主要方法。其中自适应控制针对系统模型的未知参数会在系统运行过程中随着系统变化，结合系统的变化改变系统控制器的参数达到期望数值^[11-12]。鲁棒控制则是能在系统建模存在一定误差的情况下，使系统仍然保持较好的稳定性。在如炮控系统这般复杂的非线性时变系统中，单靠自适应或鲁棒控制不足以获得良好的控制性能，自适应鲁棒控制可以结合 2 种方法的优点^[13]，再加上预想设计的观测器，使之能在上述复杂的环境中达到预期要求。

1 坦克炮控系统结构及数学模型

1.1 伺服系统结构

传统电液炮控系统由于采用液压油，所以存在较多缺点，如战场上若被击中会产生二次爆炸造成更大伤害、液压油的油箱在战场上容易泄露等，已经不能满足现代战争的需要^[14]。针对电液式炮控系统存在的诸多缺点，现代坦克大多采用全电式炮控

系统，全电式炮控系统如图 1 所示。

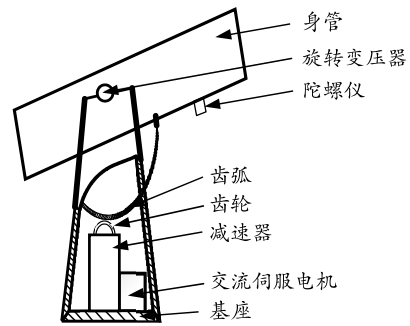


图 1 坦克炮控系统结构

1.2 伺服系统的数学模型

传统炮控系统一般是三环结构：电流环、位置环和速度环。其中位置环和速度环控制坦克身管的位置与速度，从而控制坦克的瞄准与射击，电流环一般控制炮控系统中的最大电流不过载。这种传统的三环系统存在明显的缺点就是外环即位置环的反应速度较慢，严重影响射击的稳定性与精确度。最新的坦克炮控系统去除了传统的位置环，只保留了电流环和速度环的双闭环系统，结构如图 2 所示。

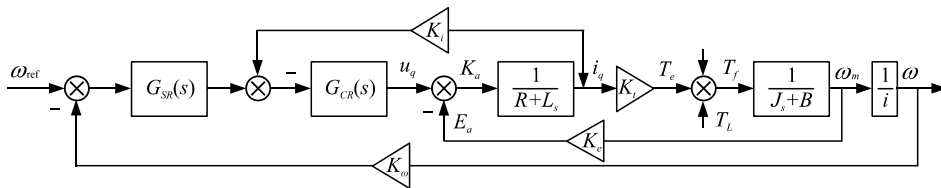


图 2 坦克炮控交流伺服系统结构

图中： ω_{ref} 为参考速度输入； ω 为坦克身管的角速度； $G_{SR}(s)$ 为速度控制器； $G_{CR}(s)$ 为电流控制器； u_q 为电流环输出电压； K_a 为放大器增益； E_a 为电机电枢反电动势； K_e 为执行电机电磁转矩系数； L 为电枢回路电感； K_i 为 q 轴电磁反馈系数； R 为电枢回路电阻； K_ω 为身管角速度反馈系数； i_q 为 q 轴电流； K_t 为执行电机力矩系数； T_e 为执行电机电磁转矩； T_f 为摩擦转矩； T_L 为负载扰动力矩； ω_m 为电机角速度； B 为粘性摩擦系数； J 为电机转子上的总转动惯量； i 为减速比； s 为拉普拉斯算子。

由框架图，可得：

$$\dot{i}_q = -(R/L)i_q - (K_e/L)\omega + (K_a/L)\mu_q; \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = (K_t/Ji)i_q - (1/Ji)T_{LS}。 \quad (2)$$

式中 T_{LS} 为摩擦转矩和变化负载转矩的总和。对式 (1) 进行拉氏变换：

$$i_q(s) = (-K_e i \omega(s) + K_a \mu_q(s)) / (Ls + R)。 \quad (3)$$

将式(3)代入到式(2)中

$$\ddot{\omega} = -\frac{R}{L}\dot{\omega} - \frac{K_t K_e}{LJ}\omega + \frac{K_a K_t}{LJi}\mu_q - \left(\frac{R}{LJi}T_{LS} + \frac{1}{Ji}\dot{T}_{LS} \right)。 \quad (4)$$

取状态变量为 $X=(x_1, x_2)^T$ ，其中， $x_1=\omega$ ， $x_2=\dot{\omega}$ ，可推导状态方程为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{R}{L}x_2 - \frac{K_t K_e}{LJ}x_1 + \frac{K_a K_t}{LJi}\mu_q + d(t) \end{aligned} \right\}。 \quad (5)$$

式中 $d(t) = -\left(\frac{R}{LJi}T_{LS} + \frac{1}{Ji}\dot{T}_{LS}\right)$ 。 T_{LS} 中的摩擦转矩和负载转矩会随着工况的变化而变化，具有强时变非线性，因此 $d(t)$ 也是强时变非线性量，在坦克行进过程中，若将 $d(t)$ 作为简单的线性扰动项设计系统，则会很大程度影响炮控系统的精度，故设计观测器观测其实时变化。

2 自适应鲁棒控制器设计

自适应鲁棒控制可以对非线性系统进行准确的、不间断的后续学习，并根据具体决策更新控制

器结构、参数和性能效果。即使存在外部未知扰动和系统建模误差的影响下，该系统也能保持良好的稳定性。

记电子转子上的总转动惯量 J 为 θ 。将系统写为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \theta \dot{x}_2 &= u + d(t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

设所有未知参数及未知外部扰动均有界，且界已知，假设：

$$\theta \in \Omega_\theta = \{\theta : 0 < \theta_{\min} < \theta < \theta_{\max}\} \quad (7)$$

$$d(t) \in \Omega_{d(t)} \leq D \quad (8)$$

其中 θ_{\min} , θ_{\max} , $d(t)$ 已知。

记给定轨迹函数为 x_d ，定义滤波误差函数为：

$$s = e + c\dot{e} = x_2 - q \quad (9)$$

其中 $c > 0$, $e = x_1 - x_d$, $q = \dot{x}_d - ce$, e 为位置跟踪误差。

自适应鲁棒控制器设计如下：

$$u = u_a + u_r; \quad (10)$$

$$u_a = \hat{\theta}(\ddot{x}_d + x_d - x_2); \quad (11)$$

$$u_r = u_{s1} + u_{s2} \quad (12)$$

式中： u_a 为自适应控制项； $\hat{\theta}$ 为 θ 的估计值； u_r 由 u_{s1} , u_{s2} 组成， u_{s1} 为比例反馈控制项， u_{s2} 为鲁棒控制项。设计 u_{s1} 如下：

$$u_{s1} = -k_s s \quad (13)$$

其中 $k_s > 0$ 。

当不考虑系统扰动以及不确定项总和 $d(t)$ 时， $u_{s2} = 0$ ，但这只是理想情况，实际工程系统中 $d(t) \neq 0$ ，因此需要鲁棒控制项 u_{s2} 具体设计出来。根据系统需求以及实际情况设计 u_{s2} 如下：

$$u_{s2} = -\frac{h^2 s}{h|s| + \varepsilon} \quad (14)$$

其中：

$$s(\tilde{\theta} \dot{q} + (d(t) + u_{s2})) \leq \varepsilon, \quad \tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$$

式中 $\varepsilon > 0$, h 满足：

$$h = |\dot{q}| |\theta_{\max} - \theta_{\min}| + d(t) \quad (15)$$

最终设计 u 为：

$$u = \hat{\theta} \dot{q} - k_s s - \frac{h^2 s}{h|s| + \varepsilon} \quad (16)$$

3 扰动观测器的设计

由上文可知鲁棒控制项 u_{s2} 在控制过程中用来处理不确定外部扰动，且上文设计的前提是知道扰动 $d(t)$ 的界，但实际工程中 $d(t)$ 具有时变性，不易确定界，针对这种情况，需要加入一种能准确实时观

测外界未知扰动的扰动观测器并将观测结果反馈到 u_{s2} 进行补偿。由图 1、2 以及转矩平衡方程可得：

$$\dot{J}(d_\omega/d_t) = T_e - T_{LS} \quad (17)$$

为了尽可能减小误差函数 s ，记 T_{LS} , ω 为扰动观测变量，得到：

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中： $x = (\omega \ T_{LS})^T$; $u = T_e$; $y = \omega$; $A = \begin{pmatrix} 0 & -1/J \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$;

$B = (1/J \ 0)^T$; $C = (1 \ 0)$ 。则观测器的能观测性矩阵可写为：

$$CA = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1/J \end{pmatrix} \quad (19)$$

显然矩阵的秩为 2，与观测变量个数相同，所以该观测系统可观，设计观测器如下：

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + L_{FB}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中： $L_{FB} = (l_1 \ l_2)^T$; $\hat{x} = (\hat{\omega} \ \hat{T}_{LS})^T$, \hat{y} 分别为 x, y 的转态观测值。观测误差为：

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = (A - L_{FB}C)e \quad (21)$$

基于主流的极点配置法设计 $A - CL_{FB}$ 的特征值。配置理想极点为 a_1, a_2 ，观测器设计为：

$$\left. \begin{aligned} \hat{T}_{LS} &= a_1 a_2 J(\omega - \hat{\omega})/s \\ \hat{\omega} &= -\hat{T}_{LS}/J + T_e/J - (a_1 + a_2)(\omega - \hat{\omega}) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

将扰动观测器观测到的 \hat{T}_{LS} ，代入 $d(t)$ ，得到不确定扰动估计。

4 仿真分析

笔者提出的控制方法和设计的控制器将通过数值模拟进行验证。为了仿真中用到的主要参数有 $J=1.0$ 。给定仿真参考轨迹为 $x_d = \sin t$ ，幅值为 1，频率为 1，仿真时间为 10 s。给出控制器中的参数： $c=15$, $k_s=15$, $\varepsilon=0.000 \ 25$, $d(t)=10$ ，结合自适应律给出 $\theta_{\max}=1.5$, $\theta_{\min}=0.5$ 。

为了凸显文中设计的控制策略的优越性，笔者通过仿真比较了鲁棒控制和文中的控制策略。图 3、4 分别是自适应鲁棒控制与鲁棒控制下的正弦响应速度追踪，图 5、6 分别是 2 种控制策略下的位置追踪。位置误差由陀螺仪采集到的速度与目标速度的差的积分得到。图 7 为位置追踪的误差图。自适应控制的特点就是在控制过程中，自适应参数不断变

化, 保证系统的稳定性, 仿真出控制过程中自适应参数的变化, 如图 8 所示。文中设计的观测器实际观测的信号与参考扰动信号的对比如图 9 所示。

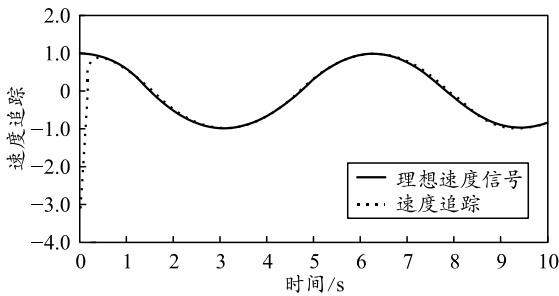


图 3 自适应鲁棒控制正弦响应速度追踪

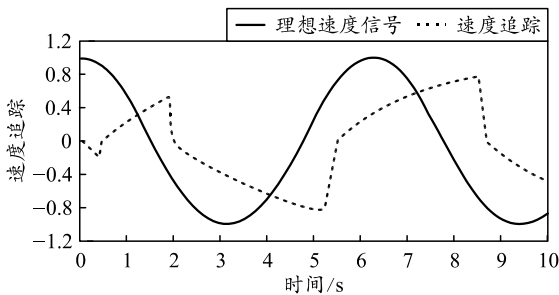


图 4 鲁棒控制正弦响应速度追踪

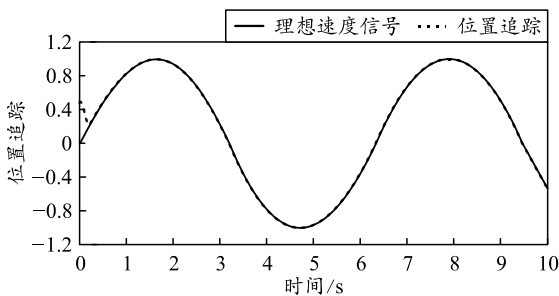


图 5 自适应鲁棒控制正弦响应位置追踪

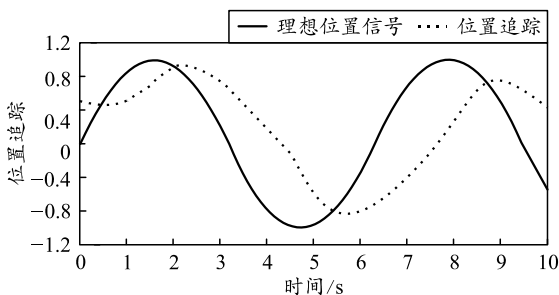


图 6 鲁棒控制正弦响应位置追踪

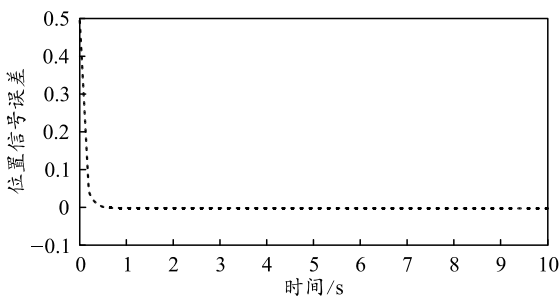


图 7 位置追踪误差

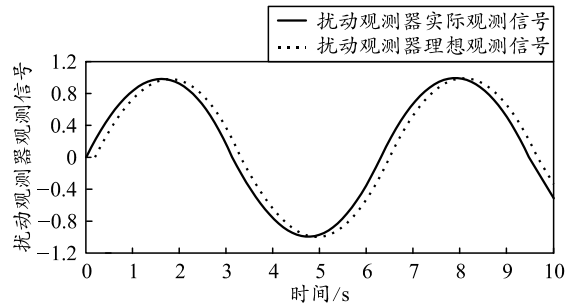


图 8 自适应参数变化轨迹

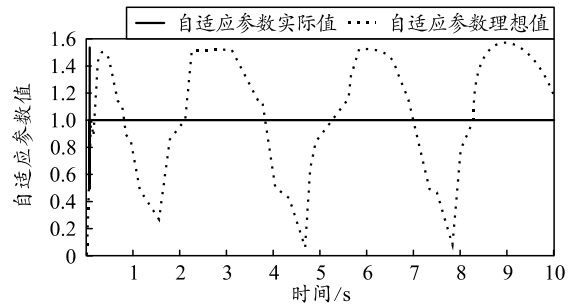


图 9 扰动观测器观测结果对比

对比图 3—6 可知, 自适应鲁棒控制相对于单一的鲁棒控制能更快、更稳定地追踪到输入信号, 且性能差距较大。由图 3、5 可知位置追踪达到稳态的时间是 0.45 s 左右。由图 7 可以看出, 达到稳态后, 后续追踪较为稳定, 最终峰值误差在 ± 0.001 内。而鲁棒控制达到稳态的时间为 1.53 s, 最大误差为 0.82, 且追踪不稳定。由仿真数据可知, 自适应鲁棒控制具有更好、更稳定地追踪特性。由图 8 可知, 自适应参数在控制的过程中是持续在线修正的, 仿真中自适应参数变化的幅值为 1.55, 最小值为 0.19, 且参数变化的曲线与给定的仿真轨迹有关。由图 9 可以看出, 文中设计的观测器能够较为准确地观测到外部扰动, 其观测误差控制在 ± 0.05 , 并且能够持续稳定观测, 性能优越。由上述可知, 提出的控制策略很好地提高了现代坦克行进间射击身管的稳定性。

5 结论

针对现代坦克高速行进间炮控系统身管稳定性存在的问题, 提出了基于扰动观测器的自适应鲁棒控制器, 将自适应控制能够主动学习外界环境变量, 优化自身参数的优点跟鲁棒控制的稳定性能相结合, 再将不易观测到的外界扰动用扰动观测器识别。仿真结果表面该控制策略通过将几种智能控制策略相结合, 抗干扰能力强, 能较好解决坦克高速行进间的身管不稳定性问题, 控制效果较好。